노트북 PC CPU 냉각용 소형 히트파이프 Packaging 연구

문석환† · 황 건* · 최태구**

(2000 년 7 월 25 일 접수, 2001 년 4 월 19 일 심사완료)

Application of Miniature Heat Pipe for Notebook PC Cooling

Seok Hwan Moon, Gunn Hwang and Tae Goo Choy

Key Words : Cooling Module(냉각모듈), Heat Sink(히트싱크), Heat Transfer Limit(열전달한계), Woven-Wire Wick(편조윅), Electronic Packaging(전자패키징)

Abstract

Miniature heat pipe(MHP) with woven-wired wick was used to cool the CPU of a notebook PC. The pipe with circular cross-section was pressed and bent for packaging the MHP into a notebook PC with very limited compact packaging space. A cross-sectional area of the pipe is reduced about 30% as the MHP with 4mm diameter is pressed to 2mm thickness. In the present study a performance test has been performed in order to review varying of operating performance according to pressed thickness variation and heat dissipation capacity of MHP cooling module that is packaged on a notebook PC. New wick type was considered for overcoming low heat transfer limit when MHP is pressed to thin-plate. The limiting thickness of pressing is shown to be within the range of 2mm ~ 2.5mm through the performance test with varying the pressing thickness. When the wall thickness of 0.4mm is reduced to 0.25mm for minimizing conductive thermal resistance through the wall of heat pipe, heat transfer limit and thermal resistance of MHP were improved about 10%. In the meantime, it is shown that the thermal resistance and heat transfer limit for the MHP with central wick type are higher than those of MHP with existing wick types. The results of performance test for MHP cooling modules with woven-wired wick to cool a notebook PC shows the stability as cooling system since T_j(Temperature of Processor Junction) satisfy a demand condition of 0 ~ 100°C under 11.5W of CPU heat.

1. 서 론

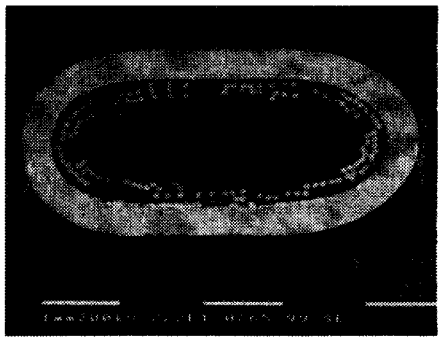
노트북 PC 시장은 그 동안 매우 급속하게 성장하여 왔으며, 상업적인 성공을 위해 노트북 PC에 요구되는 CPU 등의 부품 성능뿐 아니라 사용자 입장에서의 무게, 디자인 등이 중요하지 않을 수 없다. 최근의 정보통신 및 전자산업 전 분야에 걸친 시스템의 고밀도화와 더불어 노트북 PC 또한 초박판형 패키징 추세에 있어 노트북의 발열을 소산시키기 위한 냉각문제가 크게 대두되고 있다. 특히 노트북 PC는 다른 전자장비에 비하여 패키징 공간이 매우 제한적임에 따라 냉각을 위한 공간확보가 쉽지 않다. 따라서 노트북 PC를 성공적으로 설계하기 위해서는 CPU 및 다른 전자소자들의 배치 시 열유동 경로 확보 등의 열설계가 분리되어 다루어져서는 안 된다. 기존의 노트북 패키징 기술로는 CPU에 부착된 1차 히트파이프 및 힌지(hinge)를 통해 이송된 열을 2 차 히트파이프를 이용하여 LCD 판넬 뒤로 소산시키는 방법이 있으며,[1] 또는 열유동 경로의 최종 목적지로 키보드판 및 노트북 PC 바닥면이 이용될 수 있다. 노트북 PC에서는 케이스의 온도를 사용자로 하여금 불쾌감 없이 사용할 수 있도록 낮은 온도로 유지할 필요가 있으며, 이때 열유동 경로의 설계 착오로 CPU 등의 발열부온도를 적정온도 이하로 유지시키는 것은 가능할지라도 최종적인 열유동 목적지가 인체와 접촉하는 부분일 경우 사용자로 하여금

† 책임저자, 회원, 한국전자통신연구원 실장기술팀
E-mail: shmoon@etri.re.kr
TEL : (042)860-6087 FAX : (042)860-5804
* 한국전자통신연구원 실장기술팀
** 한국전자통신연구원 부품기술개발부

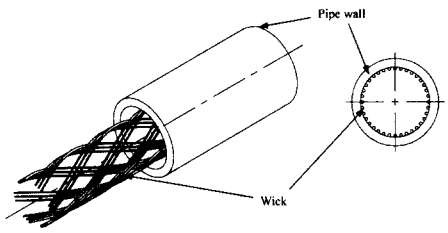
불쾌감을 유발하게 되어 상업적인 성공을 어렵게 만들 수도 있다.

본 연구에서는 냉각공간이 극히 제한적인 노트북 PC 에 MHP(Miniature Heat Pipe, 이하 MHP)를 실장(Packaging)하기 위해 원형단면 MHP 를 압착 하였다. 원형단면 MHP 에서는 삽입된 편조형 윅(woven-wired wick)이 효과적으로 벽면에 밀착이 되며, 내부 증기유동통로를 충분히 확보하는 것이 가능하다. Fig. 1 에 사용된 편조윅의 단면도를 나타내었다. 반면 Photo. 1 에서 볼 수 있듯이 원형파이프가 압착됨에 따라 증기유동 단면적은 감소하며, 직경 4mm MHP 를 두께 2mm 로 압착하였을 때 MHP 단면적은 약 30%가량 감소한다. 한편 윅은 압착된 파이프 내에서도 벽면에 밀착이 잘 되어 있다.

본 연구에서는 MHP 를 노트북 PC 에 탑재하기 위해 압착(Pressing)을 수행하였으며, 이에 따른 작동성능 변화 등을 파악하고, 노트북 PC 에 실장된 MHP 의 열소산 능력을 평가하고자 하였다. 한편 얇게 압착된 경우에 열수송능력의 한계를 극복하기 위한 벽두께 감소 및 새로운 형태의 윅 구조에 대한 검토를 수행하였다. 궁극적으로 노트북 PC의 CPU 냉각 solution으로써 최적의 MHP 냉각 기술을 확보하는 데 그 목적이 있다.



(a) SEM photograph of pressed heat pipe



(b) Structure of woven-wired wick

Fig. 1 Woven-wired wick

2. 실험장치 및 방법

편조형 윅을 갖는 MHP를 노트북 PC에 패키징하기 전에 파이프 압착에 따른 냉각성능 변화 등을 파악하기 위하여 직경 4mm의 단일 MHP에 대해 성능시험을 수행하였다. 증발부에 가해진 열부하는 니켈-크롬 열선(10Ω/m)을 통해 공급하였으며, 응축부에서의 냉각은 히트싱크(53x53x32mm) & 팬을 이용하여 강제공냉이 이루어지도록 하였다. 그 외 단열부 및 증발부의 외벽은 유리섬유의 단열재를 이용하여 대기로의 열손실을 최소화하였다. MHP 벽면 및 대기온도는 K-type(ϕ0.08mm) 열전대를 이용하여 측정하였으며, 측정점은 증발부에 2점, 단열부에 1점, 그리고 응축부에 각각 3점을 부착하였다. 작동유체는 작동온도 30~120℃의 범위내에서 잠열과 표면장력이 비교적 큰 증류수를 사용하였으며, 충전률은 전체 MHP 내부체적의 31%를 충전하였다. 사용된 편조형 윅의 가닥수(strand)는 8가닥이며, 설치 경사각은 -5° ~ +5°의 범위내에서 변화가 가능하도록 하였다.

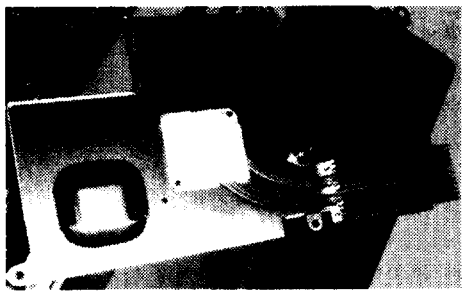
Fig. 2(a)는 노트북 PC에 패키징 된 히트파이프 냉각모듈을 보여주고 있다. Fig. 2(a)에서 볼 수 있듯이 2개의 초소형 히트파이프를 이용하여 CPU의 발생열을 히트싱크+팬으로 구성된 응축부측으로 이송시켜 냉각시키는 구조를 갖고 있다.

히트파이프에 의해 전달된 열은 응축부의 히트싱크에 의해 주위로 소산되며, CPU 의 온도가 약 80°C 이상으로 상승하면 응축부측에 설치된 팬이 작동하여 전달된 열을 외부로 방출하게 된다. TCP(Tape Carrier Package)형의 CPU와 접촉하는 증발부의 알루미늄 블록과의 사이에는 열접촉저항을 최소화하기 위하여 thermal pad를 설치하였다. 노트북 PC에 설치된 히트파이프 냉각모듈의 성능시험을 위하여 CPU 표면, 히트파이프 증발부, 단열부 및 응축부 그리고 팬출구 등에 열전대를 각각 부착하였다. Fig. 2(b)에 노트북 PC 의 CPU 냉각모듈 개략도 및 열전대의 부착위치를 도시하였다.

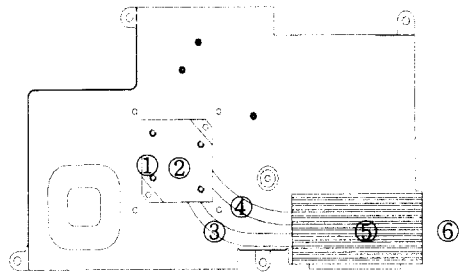
히트파이프에 공급하는 열부하는 전기적인 방법으로 이루어졌으며, 히트파이프 냉각모듈의 온도기록은 각 열부하의 단계에서 온도상승 후 정상상태에 도달하였을 때 이루어지도록 하였다. 실험을 통해 얻은 결과는 열량공급에서의 오차율(±0.05V for Voltage)과 온도계측상의 오차율(±0.1°C)을 포함할 수 있다.

3. 결과 및 고찰

3.1 패키징을 위한 MHP 구조변경에 따른 냉각특성



(a) Photograph of heat pipe type cooling module



(b) Location of thermocouples

No	Position
1	Center of CPU surface
2	Center of Al block, evaporator
3	Adiabatic zone of MHP
4	Adiabatic zone of MHP
5	Surface of heat sink
6	Exit of fan

Fig. 2 Heat pipe type cooling module

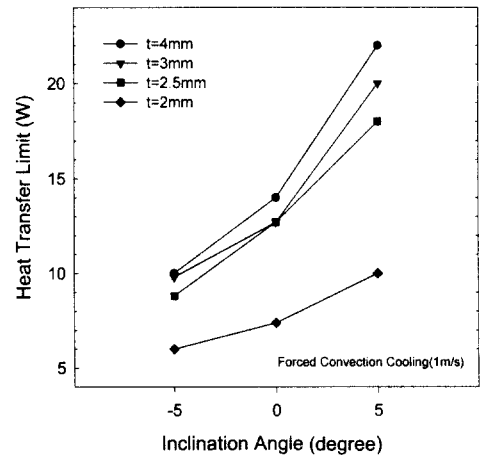


Fig. 3 Effect of pressed thickness on performance of MHP

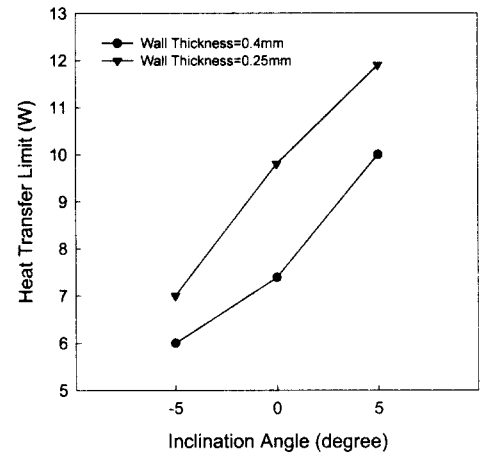


Fig. 4 Comparison of wall thickness of 0.4mm with 0.25mm on heat transfer limit of MHP

노트북 PC 등과 같이 냉각공간이 극히 제한적인 경우에 MHP 를 실장하기 위하여 필연적으로 이루어지는 파이프 압착의 두께 변화에 따른 냉각성능을 파악하고자 하였으며, Fig. 3은 직경 4mm이고 파이프 전체길이가 300mm 인 MHP 를 3mm, 2.5mm, 2mm의 두께로 각각 압착하여 성능시험한 결과를 나타낸 것이다. 제작된 MHP 의 파이프벽 두께는 0.4mm, 편조윅의 가닥수는 8 개, 충전량은 0.67cc 이다. Fig. 1 에서 보면 파이프를 압착시킴에 따라 내부 증기 유동단면적은 감소하였으나, 윅은 그럼에도 불구하고 벽면에 밀착이 잘 되어 있음을 알 수 있다. 이는 본 연구에서 사용된 편조형 윅이 가지는 탄력성에 기인하는 것이며, 구조상으로 편조형 윅이 설치된 히트파이프의 패키징을 위한 단면변화가 이루어지더라도 열수송 냉각모듈로써 의 기능은 충분히 발휘할 것으로 생각된다. Fig. 3 에서 보면 경사각 -5° ~ +5 ° 의 범위내에서 열전달률은 각 파이프 압착두께에 대하여 경사각 증가(증발부가 응축부보다 하단에 위치하는 방향으로 경사각 증가)에 따라 상승하는 경향을 나타내고 있다. 파이프 압착두께 2mm ~ 4mm 에 대하여 최대 열전달한계는 6W ~ 22W 의 값을 기록하였으며, -5 ° ~ +5 ° 의 경사각 변화에 따라 최소 66% ~ 최대 120%까지의 상승폭을 보였다. 경사각변화에 다소 큰 열전달한계의 변동을 나타내는 것은 히트파이프의 냉각성능이 중력의 영향을 많이 받음을 의미하는 것으로 이는 윅이 삽입되게 되는 히트파이프로써 다소 바람직스럽지 못하나 본 연구에서 사용한 편조형 윅이 가지는 특성 및 모세관력 한계에 기인하여 나타나는

현상으로 이해하여야 할 것으로 생각된다. 한편 Fig. 3 에서 보면 파이프 압착두께가 4mm 로부터 점차 얇아짐에 따라 최대 열전달한계는 감소하고 있다. 압착두께 2.5mm 까지는 12% ~ 18%의 작은 감소폭을 나타내고 있어 파이프 압착두께로 인한 냉각성능 감소를 예상해 볼 때 안정적인 작동특성을 나타내는 것으로 볼 수 있다. 그러나 압착두께가 2mm 로 얇아짐에 따라 열전달한계가 크게 감소하고 있으며, 40% ~ 50%의 다소 큰 값의 하락폭을 나타내고 있다. 이는 압착두께 2mm 가 편조형 윅을 사용한 히트파이프가 가지는 압착두께의 최소 요구조건을 의미한다고 볼 수 있다.

히트파이프식 냉각모듈의 응용시 열유동 경로의 전체 열저항 중 파이프벽을 통한 전도 열저항을 최소화하기 위하여 구리(무산소동)재질의 벽두께를 0.25mm 까지 감소시켜 MHP 를 제작, 성능시험을 수행하였다. Fig. 4 에 윅의 가닥수가 8, 길이 300mm 이며, 두께 2mm 로 압착한 MHP 에 대해 기존의 파이프벽 두께 0.4mm 일 때와 벽두께를 줄인 0.25mm 일 때의 성능시험 결과를 비교하여 도시하였다. 1m/s 의 강제냉각 조건하에서 -5° ~ +5°의 경사각변화에 따른 열전달한계(Heat Transfer Limit)는 벽두께 0.4mm MHP보다 두께가 얇은 0.25mm MHP 에서 더 크게 나타났으며, 약 10% ~ 19%가량 향상된 열전달한계값을 보였다. 증발부 및 응축부에서의 벽면을 통한 전도 열저항이 파이프벽 두께를 기존 것에서 37%가량 감소 시킴에 따라 어느 정도 최소화할 수 있음을 확인했다.

원통형 히트파이프에서는 동일한 히트파이프 구조에 대하여 직경 크기가 작아짐에 따라 열전달한계가 지수 함수적으로 감소하는 변화 양상을 띤다.[2] 특히 파이프를 얇은 평판형으로 압착하게 되면 내부 증기유동 단면적이 크게 감소하게 되어 높은 열전달한계를 기대하기가 어렵게 된다. 본 연구에서는 편조형 윅을 사용하고 평판형 구조인 기존 MHP(윅이 환상형으로 벽에 밀착된 형태)와 윅 중앙위치식 MHP의 열전달 특성을 비교하고자 성능시험을 수행하였으며, 이에 대한 결과를 Fig. 5 에 도시하였다. 그림에서 보면 열부하의 증가에 따라 MHP의 열저항은 감소하고 있으며, 다만 기존 윅 형태의 MHP는 6W 이상의 열부하범위에 대하여 열저항이 1°C/W 이하로써 낮은 값을 나타내고 있는 반면, 윅 중앙위치식 MHP는 전 열부하 범위에 대하여 2°C/W 이상의 높은 열저항을 보였다. 윅 중앙위치식 MHP는 파이프를 압착하였을 때 판형의 중심부위가 함몰하는 현상을 방지할 수 있어 얇은 두께를 갖는 판형인 경우에 증기 유동 통로의 감소를 최소화 시킬 수 있어 냉각성능 면에서 유리할 수도 있으나, 실험결과 원활한 상변화 열전달이 이루어지지 않는 것으로 파악된다.

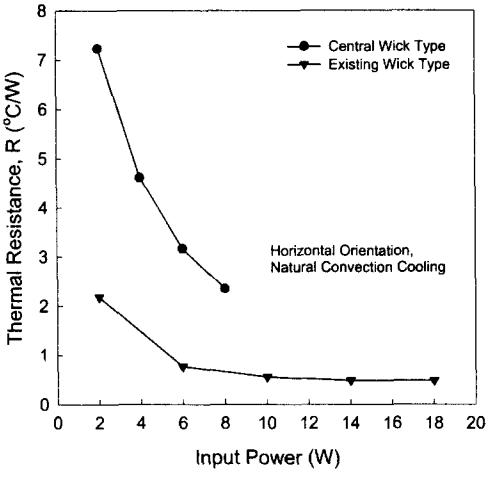


Fig. 5 Comparison of central wick type with existing wick type on thermal resistance of MHP

열저항, R(℃/W)은 다음 식 (1)로 정의된다.

$$R = \frac{T_e - T_c}{Q} \tag{1}$$

여기서 T_e는 MHP의 증발부 벽면온도이며, T_c는 응축부 벽면온도, 그리고 Q는 증발부에 가해진 열부하(W)이다.

3.2 패키징된 MHP 냉각모듈의 전열특성

Fig. 6과 Fig. 7은 편조형 윅을 노트북 PC에 패키징하여 냉각성능 시험을 수행한 결과를 도시한 것이다. 현재 시판되고 있는 A사의 노트북 PC CPU 냉각모듈은 히트파이프 2개, 히트싱크 그리고 히트스프레드 및 팬으로 구성되어 있다. 히트파이프와 히트스프레드와의 열 접촉저항을 최소화하기 위해 Thermal Joint Compound(Thermalloy Co.)를 사용하였다. 히트파이프 종류별 평균시험 시간은 약 12시간이 소요되었으며, 각 위치에서의 온도는 2초 간격으로 측정하였다. 설치된 팬은 일정온도(80°C) 이상에서만 동작하도록 설계되어 있으며, 그 이하의 온도에서는 자연공냉에 의해 열소산이 이루어진다. Fig. 6은 HDD(Hard Disk Drive)의 연속적인 읽기/쓰기와 CD-ROM 드라이브의 연속적인 읽기의 부하를 가한 상태에서 각 위치별 온도분포를 나타낸 것이다. 각 위치별 온도 측정점은 Fig. 2(b)에 표시하였으며, Temperature Difference는 각 지점의 온도와 주위온도와의 차를 의미한다. Fig. 6 에서 보면 1, 2, 3번 지점에서의 온도구배가 많이 발생하고 있으며, 이는 히트파이프와 히트스프레드 그리고 CPU표면(엄밀히는 Thermal Transfer Plate

표면) 사이의 접촉 열저항이 상대적으로 큼을 말해준다. 성능시험 결과 얻어진 온도분포는 주위온도가 24°C~27°C일 때 CPU발열량 11.5W의 동작환경에서 요구조건인 T_j(Temperature of Processor Junction)의 0°C ~ 100°C를 만족하고 있어 냉각모듈로써 안정적인 것이라고 할 수 있다. Fig. 7은 모사발열체(35mm×35mm×5mm)를 이용하여 히트파이프 냉각모듈에 대해 열부변화에 따른 성능시험을 수행한 결과를 도시한 것이다. 그림에서 보면 히트파이프없이 알루미늄판에 의해서만 전도열전달이 이루어지는 경우 증발부와 응축부의 온도차(T_e-T_c)가 매우 커 정상적인 열소산이 이루어지기는 어려움이 있음을 알 수 있다. 다만 Fig. 3에서 언급했듯

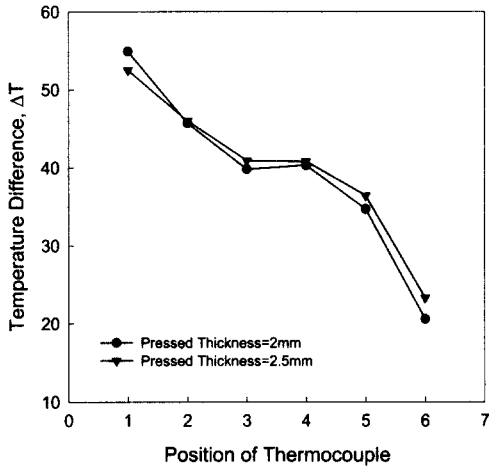


Fig. 6 Temperature difference according to position of thermocouple on a notebook PC

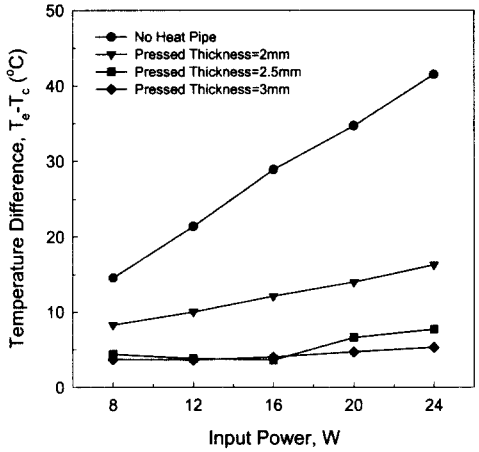


Fig. 7 Temperature difference between evaporator and condenser according to input power

이 파이프 압착 두께 2mm일 때 증발부와 응축부의 온도차는 상대적으로 2.5mm 및 3mm에 비해 높게 나타나고 있어 편조윅 MHP의 한계 압착두께는 2mm와 2.5mm 사이에 존재할 것으로 파악된다.

4. 결 론

노트북 PC CPU 냉각을 위해 사용된 편조형 윅을 갖는 MHP의 냉각성능을 파악하기 위한 실험을 수행하였으며, 얻어진 결론을 정리하면 아래와 같다.

(1) 편조형 윅이 삽입된 MHP는 패키징을 위한 압착두께, 2.5mm까지 원활한 작동성능을 나타내었으며, 그러나 압착두께, 2mm에서는 냉각성능이 크게 감소하였다. 따라서 패키징을 위한 한계 파이프 압착두께는 2mm ~ 2.5mm 사이에 존재하는 것으로 파악된다.

(2)MHP의 벽두께를 0.4mm에서 0.25mm로 줄임에 따라 열전달한계 및 열저항을 약 10%가량 향상시킬 수 있었다.

(3)윅의 중앙위치식 MHP는 기존의 환상형 윅 구조를 갖는 MHP에 비하여 높은 열저항 및 낮은 열전달한계를 나타내었다.

(4)편조형 윅 MHP가 탑재된 노트북 PC 냉각성능시험 결과 CPU 발열량 11.5W의 작동환경에서 요구조건인 T_j(Temperature of Processor Junction)의 0°C ~ 100°C 를 만족하고 있어 냉각모듈로써 안정적이었다.

참고문헌

(1) Eguchi, K., Mochizuki, M., Mashiko, K., Goto, K., Saito, Y., Nagaki, Y., Takamiya, A., Nguyen, T., 1997, "Cooling of CPU Using Micro Heat Pipe," Fujikura Co., Technical Note, Vol. 9, pp. 64~68.

(2) Xie, H., Aghazadeh, M., Toth, J., "The Use of Heat Pipes in the Cooling of Portables with High Power Packages," Thermacore Co., Technical Note.

(3) Babin, B. R., Peterson, G. P., Wu, D., 1990, "Steady-State Modeling and Testing of a Micro Heat Pipe," *ASME J. of Heat Transfer*, Vol. 112, No. 3, August, pp. 595~601.

(4) Kurustalev, D., and Faghri, A., 1993, "Thermal Analysis of a Micro Heat Pipes," *Accepted for Publication in The ASME J. of Heat Transfer*, ASME HTD, Vol. 236, pp. 19~30.

(5) Mochizuki, M., 1998, "Advanced Cooling System Using Miniature Heat Pipes and High Aspect Ratio Fins for Electronics Cooling," *2nd Heat Pipe Workshop*, pp. 11~20.

(6) Moon, S. H., Choon C. G., Hwang, G., Choy, T. G., 2000, "Experimental Study on Performance of a Miniature Heat Pipe with Woven-Wired Wick," *ITherm 2000*, Vol. 2, pp. 129~133.